



Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales
Universidad Nacional de La Plata

Trabajo final de la carrera de Ingeniería Forestal

**Productividad aérea y ciclo de nutrientes en plantaciones de
Populus deltoides ‘Australia 129/60’ en sistemas endicados del
Bajo Delta del Río Paraná.**

Alumno: Del Tufo, Nicolás Ariel (Legajo N° 24118/5)

Director: Dra. Carolina A. Pérez

Codirector: Ing. Agr. Darío S. Ceballos

Índice

Resumen	Pág. 2
Introducción	Pág. 3
Objetivo	Pág. 6
Materiales y métodos	
Área de estudio.....	Pág. 6
Suelo.....	Pág. 7
Biomasa.....	Pág. 8
Crecimiento y productividad.....	Pág. 8
Caída a la hojarasca.....	Pág. 9
Mantillo.....	Pág. 9
Concentración de nutrientes y mineralomasa.....	Pág. 10
Flujos del ciclo de nutrientes.....	Pág. 10
Índices de eficiencia.....	Pág. 11
Resultados	
Biomasa.....	Pág. 12
Productividad.....	Pág. 13
Concentración de nutrientes y mineralomasa.....	Pág. 14
Mantillo.....	Pág. 18
Flujos del ciclo de nutrientes.....	Pág. 19
Índices de eficiencia.....	Pág. 21
Discusión	Pág. 21
Conclusiones	Pág. 25
Pasantías vinculadas	Pág. 26
Bibliografía	Pág. 26

Resumen

A pesar de la relevancia de las plantaciones de *Populus sp.* en el delta del Paraná, escasos son los estudios realizados acerca de los flujos de nutrientes.

El objetivo del presente trabajo fue estimar la productividad primaria aérea neta (PPAN), y describir el ciclo de los nutrientes N, P, K, Ca y Mg de una forestación de *Populus deltoides* 'Australia 129/60' bajo un sistema endicado en el bajo delta del Paraná.

La biomasa se estimó mediante técnicas de análisis dimensional y luego la mineralomasa se estimó como el producto de la biomasa de cada uno de los compartimentos por sus respectivas concentraciones de nutrientes.

Se estimó la circulación de los nutrientes en la plantación, con la excepción de los flujos relacionados con el balance hídrico.

La biomasa total fue 112,7 Mg/ha. Los resultados obtenidos indican que los compartimientos más importantes en cuanto a su biomasa fueron en orden de importancia el fuste, las ramas dentro del rango de 1 a 5 cm., y la corteza con 71,3, 15 y 11,7 Mg/ha respectivamente. Estos representaron el 63,3%, 13,3% y 10,4% de la biomasa total. El 13% de biomasa restante correspondió en orden de importancia a ramas < 1cm., ramas > 5 cm., hojas, ramas muertas y brotes.

La PPAN fue $19,1 \pm 1,5$ Mg ha⁻¹año⁻¹. De este valor, el incremento leñoso significó el 68% y la producción de estructuras anuales el 32% restante.

La producción anual de estructuras demandó un porcentaje mayor de los nutrientes requeridos (81% del N, 72% del P, 69% del K, 81% del Ca y 83% del Mg) que la retención en el leño, exceptuando al carbono (36% requerimientos de estructuras anuales y 64% retención).

La redistribución de los nutrientes contribuyó a los requerimientos en distintos grados para cada nutriente (N: 37%, P: 36%, K: 37%, Mg: 31%). En el caso del Ca la redistribución fue nula y los requerimientos de dicho nutriente fueron provistos totalmente por la absorción.

El retorno de nutrientes a través de la caída fina representó 69% del N, 59% del P, 52% del K, 82% del Ca y 77% del Mg absorbido a lo largo de un año.

La eficiencia en el uso de nutrientes fue (media \pm error estándar):

N = 171 ± 5 , P = 2701 ± 222 , K = 422 ± 22 , Ca = 177 ± 17 y Mg = 908 ± 136 .

Se concluye que un manejo adecuado de los residuos de la cosecha constituye un elemento clave para mantener sucesivos ciclos de producción de estas plantaciones en el área de estudio.

Introducción

La disponibilidad de nutrientes (carbono, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, etc.) es una característica fundamental del ambiente de las plantas que determina de modo decisivo muchos aspectos de la estructura, composición y funcionamiento de la vegetación (Terradas, 2001).

El flujo de la energía en un ecosistema está muy asociado con el almacenamiento, transferencia, y reciclado de los elementos químicos. Estos elementos químicos vinculados con el flujo de la energía son re-utilizados dentro del ecosistema indefinidamente, a menos que sean transferidos al ciclo de otro ecosistema o bien sean transformados en formas que permanecen inmóviles por mucho tiempo (Kimmis, 1987).

Los nutrientes ingresan al ecosistema a través de la meteorización de las rocas, la fijación biológica del nitrógeno atmosférico, la incorporación de nutrientes desde la atmósfera por la lluvia y el viento y/o por la fertilización, en el caso de sistemas manejados. Dentro del ecosistema, el reciclado de los nutrientes incluye el cambio de éstos de la forma orgánica a la inorgánica, reacciones químicas que conducen a cambios en las formas iónicas de los elementos, la incorporación biológica por parte de las plantas y los microorganismos y el movimiento e intercambio dentro de la matriz del suelo (Chapin *et al.*, 2002).

Las salidas de nutrientes del ecosistema son atribuidas principalmente al lixiviado, emisión gaseosa, fuego, erosión hídrica y eólica y por la remoción de materiales en la cosecha (Chapin *et al.*, 2002).

Switzer y Nelson (1972) proponen que la circulación de nutrientes en un bosque puede ser definida en términos de tres niveles de ciclos: ciclos geoquímicos, ciclos biogeoquímicos y ciclos bioquímicos.

Los ciclos geoquímicos comprenden la incorporación de nutrientes al ecosistema mediante procesos de meteorización del material originario del suelo y las pérdidas de nutrientes, principalmente debidas a lixiviación de compuestos solubles y procesos de erosión. Estos procesos son generalmente lentos comparados con el ciclo de vida de los árboles (Landsberg, 1986).

Los ciclos biogeoquímicos comprenden las relaciones planta-suelo, incluyendo los ingresos de nutrientes en el suelo por fijación simbiótica de nitrógeno atmosférico y descomposición de la materia orgánica y los egresos de nutrientes, por la absorción de las plantas, por fuego, y en los bosques, por la remoción de la madera. La tasa de liberación de nutrientes al suelo por descomposición depende de las condiciones ambientales, y la cantidad y tipo de nutrientes liberados desde la materia orgánica dependen de la masa y composición del sustrato. La absorción de nutrientes por las plantas suele ser mayor en la estación de crecimiento y es proporcional a la tasa de incremento de la materia seca (Landsberg, 1986).

Los ciclos bioquímicos comprenden las relaciones internas de transferencia de nutrientes, es decir, la redistribución de nutrientes móviles dentro de los individuos. Los nutrientes son removidos antes de la senescencia de tejidos cuyo tiempo de vida es corto, tales como las hojas, y son redistribuidos hacia tejidos en activo crecimiento o bien hacia sitios de almacenamiento (Chapin *et al.*, 2002). En etapas tempranas de crecimiento de los árboles la mayor parte de los nutrientes son tomados del suelo y retenidos en la biomasa, pero a medida que los árboles crecen, aumenta la contribución de la circulación interna de nutrientes a los requerimientos de incrementos de materia seca (Landsberg, 1986).

Dentro de una misma zona climática existe una fuerte correlación positiva entre la fertilidad del suelo y la productividad de la vegetación (Chapin *et al.*, 2002). A su vez, el funcionamiento sustentable de un ecosistema se basa en el mantenimiento y estabilidad de su productividad y capital de nutrientes (Cuevas y Medina, 1998). Dado que durante las etapas tempranas de crecimiento de un bosque la mayoría de los nutrientes son incorporados en nueva biomasa, las rotaciones cortas pueden resultar en una gran extracción de nutrientes del ecosistema. Un aprovechamiento intensivo y ciclos cortos de rotación, pueden llevar a que un bosque se asemeje a un cultivo agrícola en cuanto a la remoción de nutrientes (Attiwill y Beeper, 1987). Desde los lineamientos de la sustentabilidad, los estudios sobre el ciclo de nutrientes en especies de ciclos cortos son importantes para el manejo de las plantaciones forestales (Lodhiyal *et al.*, 1995, Laclau *et al.*, 2003).

La región forestal del delta del Paraná es de importancia, dado que constituye la mayor superficie forestada con salicáceas del país, con 58.000 ha implantadas (Borodowski y Suárez, 2005), donde el género *Populus sp.* es uno de los más relevantes de dicha familia. En la zona se encuentran destinadas a la producción de álamos aproximadamente 14.000 ha, cuyo destino final será el aserrado, debobinado o la obtención de pasta celulósica.

A pesar de la relevancia de las plantaciones de *Populus sp.* en el delta del Paraná, y del creciente interés a nivel mundial en la conservación de las funciones ambientales de los humedales, escasos son los estudios realizados acerca de los flujos de nutrientes (Di Stilio *et al.*, 1995; Vicari *et al.*, 1998, 1999; Senisterra *et al.*, 2006; Ceballos y Jobágy, 2009).

A nivel ecológico, el delta del Río Paraná es considerado un macro-mosaico de humedales (Malvárez, 1997), conformado por planicies aluviales, sujetas a inundaciones de diferente intensidad y duración que condicionan los sistemas de producción. Como una forma de minimizar el riesgo de estos eventos se recurre a la construcción de diversas obras de protección y de manejo del agua. En el núcleo forestal del delta se construyen en forma generalizada endicamientos, conformados por terraplenes sobre el perímetro de los establecimientos o islas y un sistema de zanjas y sangrías que drenan los campos. Aunque estas obras permitirían atenuar la incidencia de

las inundaciones, generan modificaciones en los ambientes afectando la dinámica natural del agua e impidiendo el aporte de sedimentos por parte de los ríos (Ceballos, *comunicación personal*).

La biomasa de los árboles constituye una estimación necesaria para entender el flujo de la materia a través del ecosistema y, a su vez, la masa mineral que ésta contiene permite estimar el efecto de la cosecha de productos forestales sobre la disponibilidad de nutrientes del suelo (Goya *et al.*, 2003).

Populus deltoides es considerada una especie de rápido crecimiento. En el Delta del Paraná, las plantaciones de esta especie sobre diques protegidos de las crecidas del río alcanzaron, a los 8 años de edad, una biomasa aérea de 77,1 Mg ha⁻¹ (Vicari *et al.*, 1999). La productividad primaria neta aérea de estas plantaciones fue cercana a los 16 Mg ha⁻¹ año, mayor que en aquellos expuestos a inundaciones (Di Stilio *et al.*, 1995). La caída al mantillo de plantaciones dentro del dique abarcó el período de octubre a junio y a los 6 años de edad fue 7,3 Mg.ha⁻¹ año⁻¹ (Di Stilio *et al.*, 1995). Los distintos componentes de la caída al mantillo variaron en su importancia en el período mencionado, reflejando la fenología de la especie, pero las hojas representaron el 94 % del total de la caída (Di Stilio *et al.* 1995). Los contenidos de nutrientes en los compartimentos de la caída también mostraron variaciones en el tiempo. La mineralomasa de N en los compartimentos aéreos de los árboles de dicha plantación fue 502 kg/ha (Vicari *et al.*, 1999) y el contenido de N en la caída anual fue de 156 kg.ha⁻¹.año⁻¹ (Di Stilio *et al.*, 1995). Vicari *et al.* (1998) estimaron una elevada tasa de descomposición foliar de *P. deltoides* en la plantación protegida de las inundaciones (k= 1,35). Estos autores relacionaron esta alta tasa de descomposición, con los cambios en la masa del mantillo, que varió entre de 4,9 Mg ha⁻¹ en julio a 0,57 Mg ha⁻¹ en noviembre.

El objetivo de este trabajo fue analizar algunos aspectos de la dinámica de nutrientes, y de la eficiencia en el uso de los mismos en relación con la productividad primaria y acumulación de biomasa. Los objetivos alcanzados contribuirán a la comprensión y conocimiento de la funcionalidad de este tipo de sistemas, aportando información para la elaboración de prácticas forestales amigables con el ambiente, sobre todo las relacionadas con el aprovechamiento del bosque.

Objetivo

Estimar la productividad primaria aérea neta (PPAN), y describir el ciclo de los nutrientes N, P, K, Ca y Mg de una forestación de *Populus deltoides* ‘Australia 129/60’ bajo un sistema endicado en el bajo delta del Paraná.

Objetivos específicos:

- Estimar la distribución de los nutrientes (C, N, P, K, Ca, Mg) en los compartimentos de la biomasa aérea de *Populus deltoides*.
- Conocer la cantidad de dichos nutrientes requerida para sostener esa producción.
- Estimar la absorción de nutrientes del suelo y la atmósfera en el caso del C.
- Estimar la redistribución de los nutrientes y analizar su eficiencia de redistribución.
- Conocer el retorno anual de nutrientes.
- Estimar la eficiencia en el uso de nutrientes.
- Establecer si existen nutrientes limitantes del crecimiento, a partir de los índices de eficiencia y el cociente N:P.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la subunidad A2 “Islas del Río Carabelas” (Kandus, 1997) de la unidad “Bajo Delta Bonaerense” (Bonfils, 1962) o “Pajonales y bosques del Bajo Delta” (Malvárez, 1997) de Latitud: 30° 10' 22'' y Longitud: 58° 42' 12''. Según la clasificación climática de Köppen -Geiger (Strahler y Strahler, 1992) la región se caracteriza por un tipo climático Cfa, es decir templado con lluvias todo el año y temperatura media del mes más cálido superior a 22° C (Malvárez, 1997). Las temperaturas medias anuales oscilan alrededor de los 16.7°C y 18°C y las precipitaciones son cercanas a los 1000 mm año⁻¹ (Berrondo, 1988). Por otro lado, los suelos del Bajo Delta son aluviales conformados por la deposición de sedimentos transportados, principalmente, por el Río Paraná. Los mismos poseen textura limo-arcillosa con capas de arena fina producto de ingresiones marinas, en general fértiles, aunque compactos, mal aireados y de pH ácido (Bonfils, 1962).

Los rodales de *Populus deltoides* ‘Australia 129/60’ estudiados constituyen el primer ciclo forestal luego de las labores de endicamiento y drenaje del bañado. Se seleccionaron tres parcelas experimentales de 1500 m² en forestaciones de 10 años de edad, con una distancia original de plantación de 5 x 3 m. (667 árboles/ha); para la plantación se utilizaron estacas de aproximadamente 80 cm de longitud. Al quinto año se realizó un raleo selectivo por lo bajo en el cual se removieron aproximadamente el 30% de los individuos (densidad actual 407, 413 y 393 árboles ha⁻¹). En cada

parcela se midió el DAP con cinta diamétrica de todos los individuos y la altura total con hipsómetro de una submuestra de $n = 12$ individuos distribuidos en todo el rango de distribución diamétrica de cada parcela, a partir de los cuales se ajustó una relación hipsométrica por parcela (Clutter *et al.*, 1983).

Suelo

Los datos de suelos correspondientes a las tres parcelas estudiadas se obtuvieron de la descripción y análisis realizados por Ceballos *et al.* 2006.

Los perfiles de suelos son de escaso desarrollo de horizontes, presentando un horizonte Gley formado en condiciones de napa de agua fluctuante y cercana a la superficie, con rasgos de hidromorfismo presentes en todo el perfil. Los suelos de las tres parcelas fueron clasificados dentro del orden de los Entisoles como Endocuento típico, Familia Franca Fina, Mixta y Térmica según Soil Survey Staff (1999).

En las tablas 1 y 2 se presentan las características de los suelos relevados, correspondiente a las medias de las 3 parcelas para cada capa. Las variables de suelos presentadas, tienen para todas las variables medidas coeficientes de variaciones bajos ($<5\%$), afirmando que las parcelas corresponden a auténticas réplicas.

Tabla 1: Caracterización química y física de suelos de los sitios experimentales (Medias de las 3 parcelas).

Capas	Densidad Aparente (Mg.m ⁻³)	Espesor de la capa (cm)	pH	C:O (%)	N (%)	P ext (ppm)	Cationes de intercambio (cmol.kg ⁻¹)				CIC (cmol.kg ⁻¹)	Clase Textural
							Ca	Mg	K	Na		
C1	0.74	10	4.86	14.59	0.36	48.20	11.02	6.21	0.42	1.53	19.18	Franco Arcillo Limoso
C2	1.38	34	4.97	1.07	0.09	10.77	6.72	5.78	0.32	1.63	14.46	Franco Arcillo Limoso
C3	1.49	56	5.19	0.43	0.05	19.47	4.26	3.75	0.20	1.69	9.91	Arcillo Limoso

Tabla 2: Cantidad de nutrientes por hectáreas de los horizontes del suelo de una plantación de *Populus deltoides* clon 'Australia 129/60' en el Delta del Paraná.

Contenido de nutrientes en el suelo (Kg/ha)						
Capas	C	N	P	K	Ca	Mg
C1	105511	2551	30	116	1624	558
C2	50925	4303	51	588	6208	3172
C3	36525	4105	154	659	7229	3919
Total (1m prof.)	192960	10960	234	1363	15061	7650

Biomasa

La biomasa se estimó mediante técnicas de análisis dimensional (Whittaker & Woodwell, 1968). En febrero de 2006 se apearon 22 individuos distribuidos proporcionalmente en las frecuencias diamétricas de las parcelas. De cada individuo el material vegetal se separó en los siguientes compartimentos:

- a) Fuste mayor de 5 cm de diámetro.
- b) Ramas mayores de 5 cm y fuste menor de 5 cm.
- c) Ramas 1-5 cm de diámetro.
- d) Ramas menores de 1 cm.
- e) Brotes del año.
- f) Hojas.
- g) Ramas muertas.

Los pesos de los compartimentos d), e) y f) se estimaron separando en el laboratorio el 25% del peso total fresco $[d + e + f]$ registrado en el campo siguiendo la metodología establecida por Goya *et al* (1997). Alícuotas del material fueron secadas en estufa a 70°C hasta peso constante para la estimación del peso seco. El porcentaje de corteza se determinó mediante el peso con y sin corteza de secciones del fuste de distintos diámetros (mayor 5 cm) (Goya *et al.*, 1997). Luego de la obtención de los respectivos pesos secos de cada compartimento se ajustaron, para cada uno de ellos, ecuaciones predictivas de su peso seco en función de distintas combinaciones de variables independientes (Crow, 1988). Se eligió luego la ecuación de mejor ajuste para cada uno de ellos. Estas ecuaciones se aplicaron a todos los individuos de las parcelas a fin de expresar el peso seco en función del área. De esta manera, se obtuvieron resultados de biomasa por unidad de superficie.

Crecimiento y Productividad aérea

El crecimiento se determinó a través del análisis de anillos de crecimiento. Se utilizaron secciones del fuste a 1,30 metros de altura (DAP), de los individuos apeados. Se determinó el incremento periódico anual (IPA) del fuste de los últimos 5 años para las distintas clases diamétricas. La productividad primaria aérea neta se estimó como la suma del incremento leñoso periódico anual más la caída a la hojarasca del período estudiado.

Para determinar el crecimiento se analizaron las secciones del fuste correspondientes al DAP. Dicho análisis consistió en partir en dos la sección de cada árbol, hacer un corte en bisel sobre las aristas de cada mitad para facilitar la visualización de los vasos leñosos y luego realizar la

identificación de los anillos de crecimiento mediante lupa binocular. Para captar la posible excentricidad de los anillos se midió en dos radios distintos de cada sección los últimos cinco anillos completos y se realizó el promedio entre ambos obteniendo un sólo valor por árbol, por diferencia con el DAP de cada árbol medido antes de ser apeado (DAP final) se estimó el DAP al comienzo del periodo considerado (DAP inicial).

La biomasa fue estimada al comienzo y al final del periodo considerado para los compartimentos de fuste, corteza, ramas > 5 cm. y ramas de 1-5 cm. haciendo uso de las ecuaciones predictivas mencionadas en la metodología para el cálculo de biomasa. La diferencia de biomasa entre el inicio y fin del periodo considerado fue dividida por el número de años de dicho periodo, obteniendo de esa forma el IPA ($\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$) para cada compartimento mencionado. Luego se calculó un promedio del IPA para cada clase diamétrica y aplicándolo a los datos de cada parcela se calculó el IPA para cada compartimento, para cada clase diamétrica y para cada parcela considerando el periodo de 5 años.

La estimación de la productividad primaria aérea neta (PPAN) se realizó al sumar el valor anual de la caída fina y el IPA de cada parcela.

Caída a la hojarasca

La caída fina (estructuras vegetales de pequeño tamaño como hojas, ramas < 1 cm. de diámetro, estructuras reproductivas) se estimó a partir de 5 canastas-trampa por parcela ubicadas al azar, las mismas tenían un 1m^2 y estaban confeccionadas con malla de 1mm^2 y elevadas a 1 metro del suelo. El material fue recolectado mensualmente durante un año calendario a partir de diciembre del 2005, exceptuando el período de máxima caída, en mayo, donde la recolección se realizó cada 15 días.

La caída a la hojarasca recolectada se separó en los siguientes compartimentos: hojas, ramas < 1cm., estructuras reproductivas y misceláneas. Luego del secado en estufa a 70°C hasta peso constante, se pesaron las muestras en balanza de precisión. La caída anual se obtuvo a partir de la sumatoria de caída mensual de hojarasca para obtener la producción anual. Para la estimación de su mineralomasa se realizaron análisis químicos de muestras de cada compartimento presente en el material recolectado.

Mantillo

Se realizó una estimación anual del mantillo a partir del promedio entre los valores máximos y mínimos correspondientes al año 2006. Se tomaron muestras de $0,50\text{ m}^2$, separándola en capa L (10 sub-muestras) y capa L + F (5 sub-muestras), distribuidas al azar en cada parcela. El mantillo se separó en: hojas, ramas < 1cm., ramas > 1cm., estructuras reproductivas y misceláneas.

Concentración de nutrientes y Mineralomasa

Las muestras de cada uno de los compartimentos identificados en la biomasa aérea fueron secadas a estufa a 70°C hasta peso constante, posteriormente se molieron con molino tipo Wiley y fueron analizadas químicamente en el laboratorio CONICET- LANAIS N°15 dependiente de la Universidad Nacional del Sur. El C total fue determinado por combustión seca utilizando un analizador automático de carbono LECO CR-12. El N total se estimó por el método semi-micro Kjeldahl. Por otra parte, las concentraciones de P, K, Ca y Mg fueron determinadas por Espectrometría de Emisión Atómica por Plasma Inducido, previa digestión húmeda de la muestra utilizando HNO₃-HClO₄.

La mineralomasa se estimó como el producto de la biomasa de cada uno de los compartimentos por sus respectivas concentraciones de nutrientes.

Flujos del ciclo de nutrientes

La circulación de los nutrientes en la plantación se calculó de acuerdo con los parámetros de Cole y Rapp (1981), con la excepción de que no se estimarán los flujos relacionados con el balance hídrico.

Retención: total de nutrientes contenido en el incremento leñoso anual, que comprende el incremento del fuste, de las ramas > 5cm. y ramas entre 1-5 cm. de diámetro. Obtenido como la suma de los productos de las concentraciones de los compartimentos por sus respectivas producciones anuales.

Requerimiento: suma de la retención más los nutrientes utilizados en la producción anual de nuevas estructuras (hojas, ramas < 1cm. de diámetro, brotes del año y estructuras reproductivas), siendo ésta última el producto de la producción de materia seca por la concentración del respectivo compartimento. Para la estimación del contenido de nutrientes en la producción anual se utilizó la biomasa de la caída a la hojarasca y no la biomasa del compartimento, tal como lo indica Cole y Rapp (1981) para especies caducifolias, debido a que la caída de hojas fue mayor que su biomasa y de otro modo se habría subestimado la producción anual. Además para corregir la pérdida de masa de las hojas de la caída se utilizó un factor de corrección de biomasa ($1/[Ca \text{ hoja viva}]/[Ca \text{ hoja caída}]$). Para la estimación del requerimiento de nutrientes en la producción anual de los brotes, se utilizó su biomasa y no los valores de su caída debido a que ésta fue despreciable, ya que se trató sólo de los brotes mal formados o afectados por algún tipo de patología puntual y no generalizada.

Cabe destacar que la concentración de nutrientes empleada en la metodología descripta fue la de los compartimentos en su estado vigoroso.

Retorno: Cantidad de nutrientes en la caída a la hojarasca. Se calculó como la suma de los productos de las concentraciones de los compartimentos por sus respectivos valores de caída mensual de materia seca.

Absorción: suma de la retención más el retorno.

Redistribución: requerimientos menos la absorción, en el caso en el que los primeros sean mayores que los segundos, ya que se supone que esta diferencia debe ser cubierta con nutrientes retenidos en las estructuras viejas.

Los flujos de nutrientes serán calculados para cada una de las parcelas de muestreo, presentándose los valores promedios (n= 3).

Índices de Eficiencia

Eficiencia de redistribución instantánea: se consideró como la diferencia de concentraciones entre la hoja viva y la hoja senescente expresada en porcentajes.

Proficiencia de redistribución (Killingbeck, 1996): se estimó como la concentración de N y P en hojas senescentes recién caídas durante el período de máxima caída. Killingbeck (1996) considera que la proficiencia es completa cuando las concentraciones de N en las hojas senescentes son menores que 7 mg/g y las del P son menores que 0,5 mg/g; la proficiencia es incompleta cuando las concentraciones de N superan los 10 mg/g y las del P los 0,8 mg/g; y la proficiencia es intermedia cuando las concentraciones están dentro de esos rangos.

Índice de eficiencia de redistribución (REI; Cuevas y Medina, 1998), fue estimada como la cantidad de nutrientes redistribuida/retorno foliar. La redistribución de nutrientes fue estimada como: $[1 - (\text{nutriente/Ca en la caída foliar} / \text{nutriente/Ca en la hoja adulta})] * 100 / \text{retorno foliar}$

Eficiencia de redistribución de la plantación: redistribución/requerimientos, expresada en porcentajes.

Eficiencia en el uso de los nutrientes (EUN): PPAN/absorción de nutrientes (Lodhiyal *et al.*, 1995).

Resultados

Biomasa

Las estimaciones de biomasa se obtuvieron al ingresar las variables dasométricas de cada parcela en las siguientes ecuaciones predictivas obtenidas para dicho fin.

$$\text{Fuste } Y = 6,32394 + 0,00955468 * (\text{DAP}^2 * H) \quad R^2 \text{ ajustado} = 87,68\%$$

$$\text{Hojas } Y = -0,43333 + 0,000527483 * (\text{DAP}^2 * H) \quad R^2 \text{ ajustado} = 78,46\%$$

$$\text{Corteza } Y = 4,13443 + 0,00139066 * (\text{DAP}^2 * H) \quad R^2 \text{ ajustado} = 77,46\%$$

$$\text{Ramas } > 5 \text{ cm. } Y = -34,0754 + 0,00241319 * (\text{DAP}^2 * H) \quad R^2 \text{ ajustado} = 64,12\%$$

$$\text{Ramas de 1-5 cm. } Y = -8,76263 + 0,00258288 * (\text{DAP}^2 * H) \quad R^2 \text{ ajustado} = 73,21\%$$

$$\text{Ramas } < 1 \text{ cm. } Y = -0,994549 + 0,000785299 * (\text{DAP}^2 * H) \quad R^2 \text{ ajustado} = 69,51\%$$

$$\text{Brotos } Y = -0,216882 + 0,000126814 * (\text{DAP}^2 * H) \quad R^2 \text{ ajustado} = 83,39\%$$

Y = Peso seco en kg para cada compartimento.

DAP = Diámetro del fuste a 1,30 mts. (cm.).

H = Altura total del fuste. (m).

La biomasa total fue 112,7 Mg/ha. Los resultados obtenidos indican que los más importantes en cuanto a su biomasa fueron en orden de importancia el fuste, las ramas dentro del rango de 1 a 5 cm., y la corteza con 71,3, 15 y 11,7 Mg/ha respectivamente. Estos representan el 63,3%, 13,3% y 10,4% de la biomasa total. El 13% de biomasa restante corresponde en orden de importancia a ramas < 1cm., ramas > 5 cm., hojas, ramas muertas y brotes.

Por otra parte las clases diamétricas de mayor importancia fueron las de 25-30 y de 30-35 cm. de DAP representando respectivamente un 58,3 y 28,7% del total de la biomasa estimada.

La tabla 3 muestra en Mg ha^{-1} la contribución de cada compartimento al total de la biomasa, diferenciando a la vez la importancia de cada clase diamétrica.

Tabla 3: Valores promedio de Biomasa (n=3) en una plantación de *Populus deltoides* clon ‘Australia 129/60’ en el Delta del Paraná.

Clase Dap	Biomasa (Mg/ha)								Total
	Fuste	Hojas	Brotes	Corteza	Ramas <1 cm	Ramas >1 cm	Ramas > 5 cm	Ramas muertas	
15-20	0,4	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
20-25	11,2	0,5	0,1	1,9	0,8	2,1	0,0	0,1	16,8
25-30	38,7	2,0	0,4	6,3	2,8	8,2	1,9	0,3	60,7
30-35	19,6	1,0	0,2	3,1	1,5	4,4	2,0	0,4	32,3
35-40	1,3	0,1	0,0	0,2	0,1	0,3	0,2	0	2,2
Total	71,3	3,6	0,8	11,7	5,2	15,0	4,1	0,9	112,7
Desvío estándar	6,5	0,2	0,1	1,0	0,5	1,7	1,7	0,2	12,0

Productividad

La PPAN fue $19,1 \pm 1,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. De este valor, el incremento leñoso significó el 68% (45% el fuste, 12% las ramas de 1-5cm., 7% la corteza y el 4% las ramas > 5cm.), y la producción de estructuras anuales el 32% restante (21% las hojas, 6% las estructuras reproductivas, 4% las ramas < 1cm. y 1% los brotes).

La caída anual fue $6,2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. La máxima caída al mantillo se registró en el mes de mayo con un valor promedio de $2,1 \text{ Mg ha}^{-1}$. Los valores más bajos correspondieron al período entre julio y octubre (Figura 1).

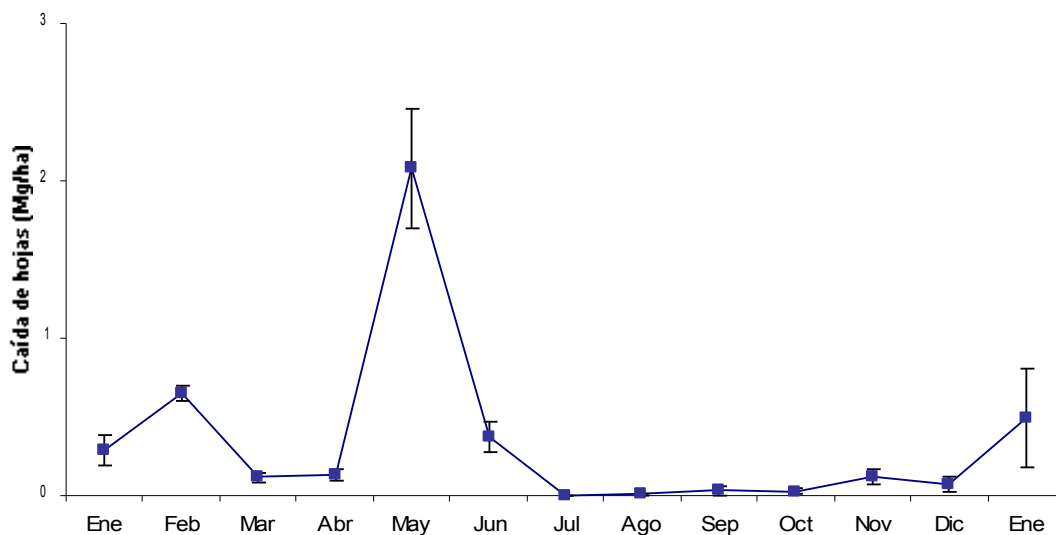


Figura 1: Caída foliar a lo largo del año 2006 en una plantación de *Populus deltoides* clon ‘Australia 129/60’ en el Delta del Paraná (n=3). Las líneas verticales indican el desvío estándar.

Concentraciones de nutrientes

Las hojas presentaron las mayores concentraciones de N, P, K, Ca y Mg. En orden de importancia siguieron los brotes y la corteza. El fuste fue el compartimento con menor concentración de dichos nutrientes (tabla 4).

Tabla 4: Valores promedio de concentración de nutrientes (n=3) para cada compartimento, en una plantación de *Populus deltoides* clon 'Australia 129/60 en el Delta del Paraná.

Compartimento	Concentración (mg g ⁻¹)					
	C	N	P	K	Ca	Mg
Fuste	459,25	1,25	0,18	1,31	0,84	0,23
Hojas	429,47	24,63	1,32	7,67	13,22	4,85
Brotes	468,52	12,60	1,43	6,98	8,16	2,07
Corteza	460,70	9,19	0,40	4,59	6,30	1,31
Ramas <1 cm	480,91	8,84	0,84	3,79	5,57	1,01
Ramas >1 cm	469,65	4,62	0,40	1,89	1,91	0,55
Ramas > 5 cm	469,57	4,12	0,18	1,26	0,94	0,30
Ramas muertas	458,73	2,99	0,34	1,34	3,33	0,48

Mineralomasa

En la biomasa aérea de la plantación se almacenaron 52 Mg ha⁻¹ de C, 424 kg ha⁻¹ de N, 36 kg ha⁻¹ de P, 236 kg ha⁻¹ de K, 255 kg ha⁻¹ de Ca y 67 kg ha⁻¹ de Mg. La distribución porcentual en compartimentos fue, en el caso del C, similar a la de la biomasa. El fuste representó el 63% del almacenaje de carbono aéreo de los árboles. En cambio, pese a que las hojas constituyeron sólo el 3% de la biomasa, su mineralomasa representó, excepto para el C, entre el 12 y el 26 % del total de estructuras aéreas, dependiendo del nutriente considerado (figuras 2 a 8).

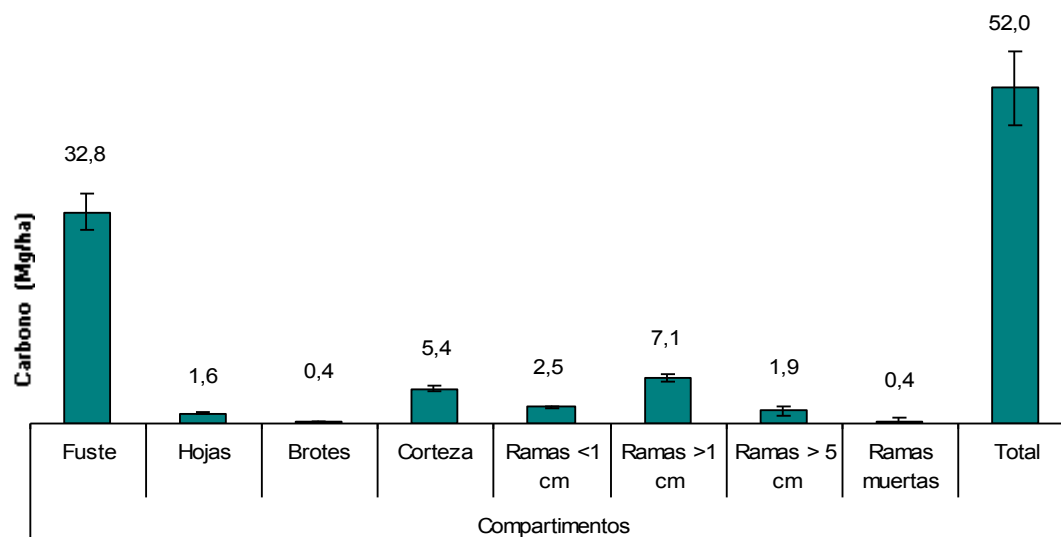


Figura 2: Almacenaje de C por compartimento de la plantación de *P. deltoides* del Delta del Paraná. (n=3). Las líneas verticales indican el desvío estándar.

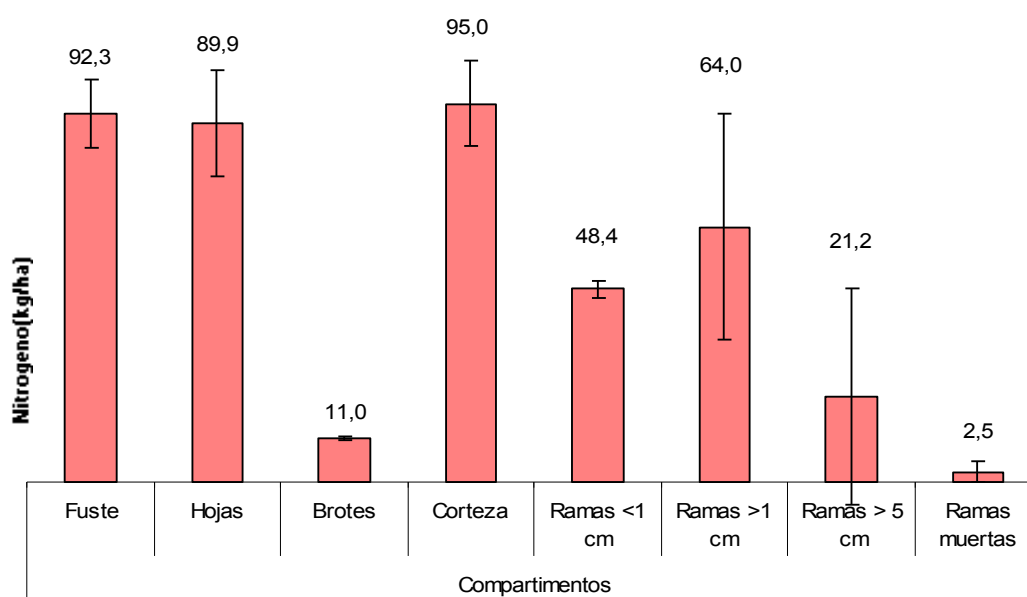


Figura 3: Almacenaje de N por compartimento de la plantación de *P. deltoides* del Delta del Paraná. (n=3). Las líneas verticales indican el desvío estándar.

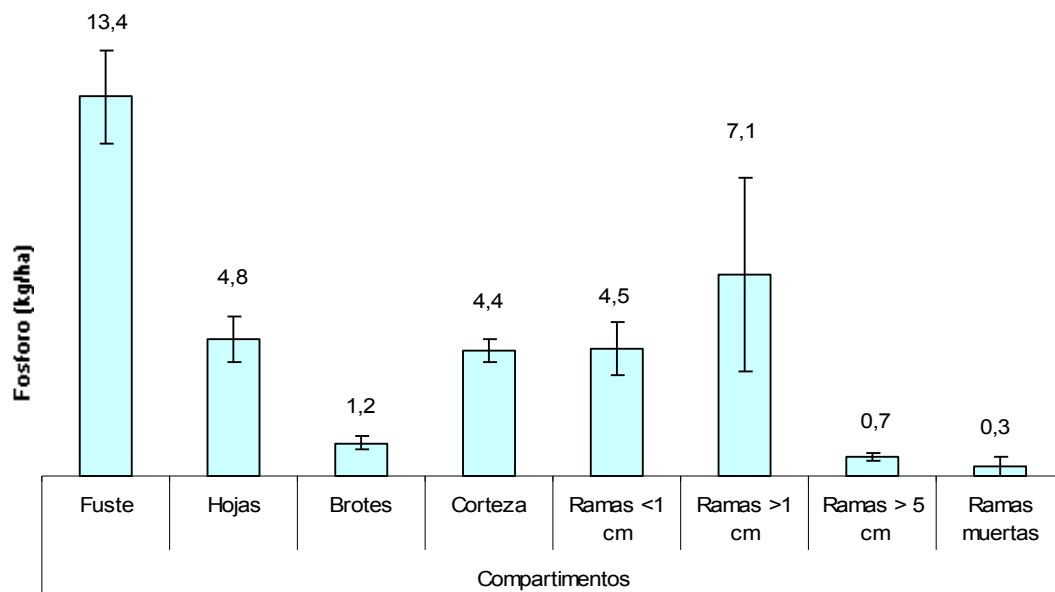


Figura 4: Almacenaje de P por compartimento de la plantación de *P. deltoides* del Delta del Paraná. (n=3). Las líneas verticales indican el desvío estándar.

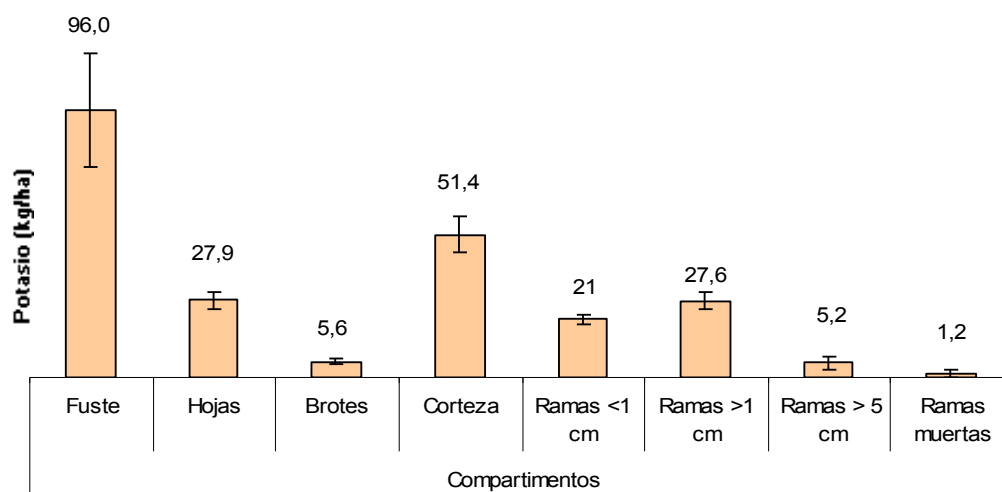


Figura 5: Almacenaje de K por compartimento de la plantación de *P. deltoides* del Delta del Paraná. (n=3). Las líneas verticales indican el desvío estándar.

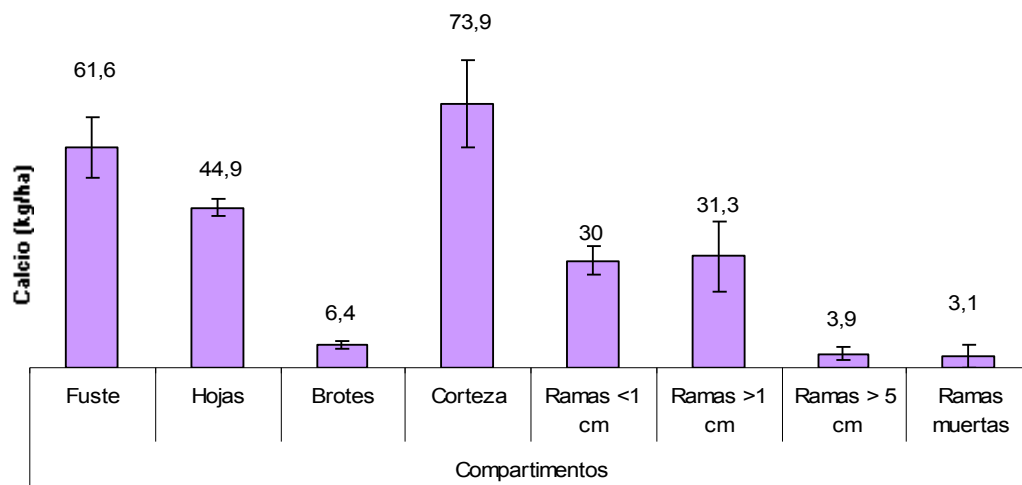


Figura 6: Almacenaje de Ca por compartimento de la plantación de *P. deltoides* del Delta del Paraná. (n=3). Las líneas verticales indican el desvío estándar.

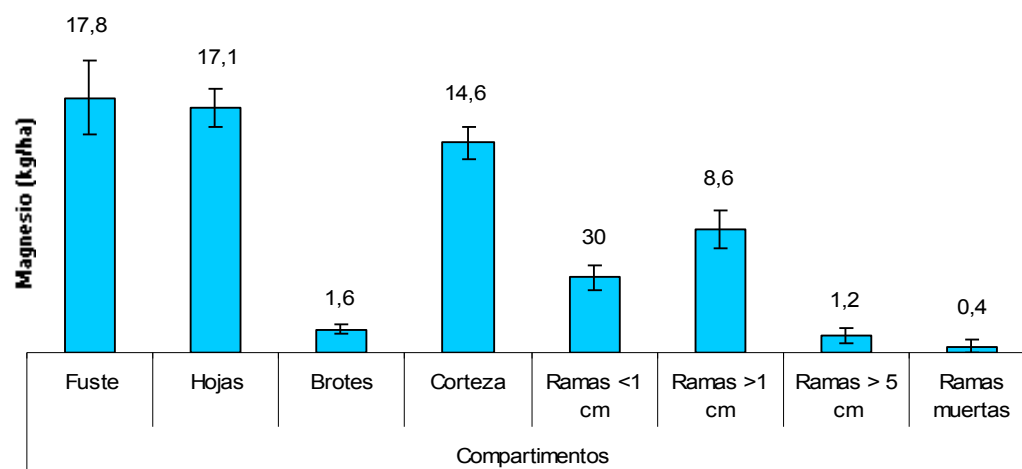


Figura 7: Almacenaje de Mg por compartimento de la plantación de *P. deltoides* del Delta del Paraná. (n=3). Las líneas verticales indican el desvío estándar.

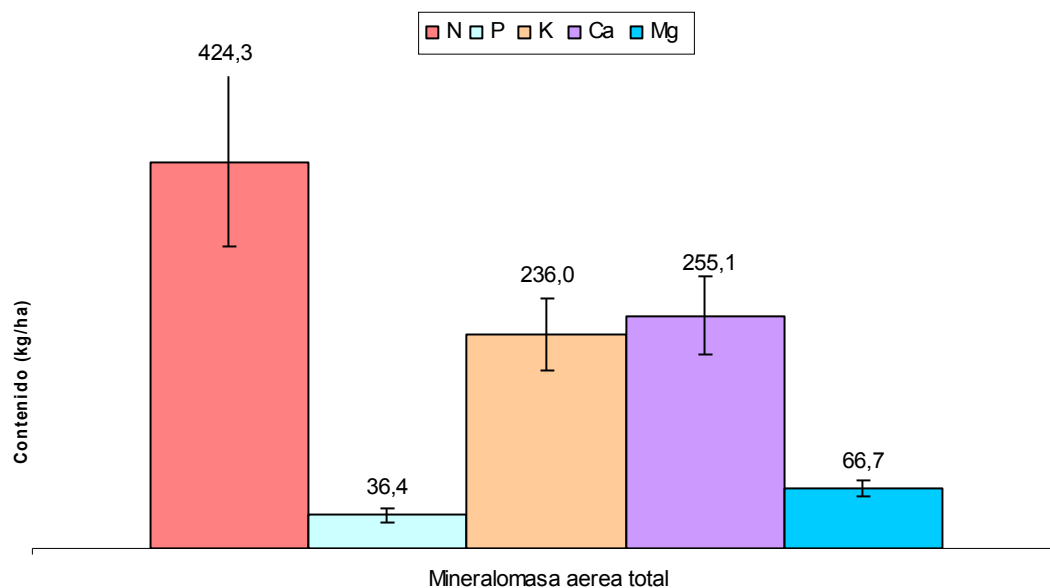


Figura 8:

Mineralomasa aérea total de la plantación de *P. deltoides* en el Delta del Paraná (n=3). Las líneas verticales indican el desvío estándar.

Mantillo

La masa promedio anual del mantillo, fue 1,67 Mg/ha, de los cuales 36% correspondió a la capa L y 64% a la capa F. Se observó una variación estacional en la masa del mantillo, registrándose valores significativamente menores para el mes de abril (0,77 Mg/ha) del orden de 38 y 35% comparado con el mes de junio (2,04 Mg/ha) y diciembre (2,19 Mg/ha) respectivamente. El promedio anual de la masa de la capa L fue 0,61 Mg/ha, distribuidos en 50% de hojas, 25% de ramas, 20% misceláneas y 5% estructuras reproductivas.

La capa F aportó a la masa mineral total una proporción mayor que la capa L para la mayoría de los nutrientes analizados (C: 59%, N: 66%, Ca: 62% y Mg: 54%) excepto para el P y K, cuya masa mineral fue aportada por la capa L en un 54 y 70% respectivamente.

Si se considera a la masa de nutrientes total del sistema como la suma de los *stocks* en el suelo hasta 1 m de profundidad, en el mantillo, en la biomasa de estructuras leñosas (fuste, corteza y ramas) y de estructuras anuales (hojas, brotes, ramas < 1cm. y estructuras reproductivas), están almacenados en este sistema (Mg/ha), 246 de C, 11 de N, 0,3 de P, 2 de K, 15 de Ca y 8 de Mg. En orden de importancia, la mineralomasa presente en el suelo representó entre 79 al 99%, en estructuras leñosas y estructuras anuales del 0,5-17% y 0,3-4,6% respectivamente y en la masa mineral del mantillo entre 0,04-0,3% del total, dependiendo del nutriente considerado.

Tabla 5: Contenido mineral del mantillo en una plantación de *Populus deltoides* clon ‘Australia 129/60 en el Delta del Paraná discriminado por capas.

Masa mineral del mantillo (kg/ha)						
Capas	C	N	P	K	Ca	Mg
Capa F	278,18	8,92	0,68	3,59	8,90	1,24
Capa L	393,97	17,37	0,58	1,50	14,82	1,46
TOTAL	672,15	26,28	1,26	5,09	23,72	2,70

Flujos del ciclo de nutrientes

Los flujos de los nutrientes se representaron en la figura 6. La producción anual de estructuras demandó un porcentaje mayor de los nutrientes requeridos (81% del N, 72% del P, 69% del K, 81% del Ca y 83% del Mg) que la retención en el leño, exceptuando al carbono (36% requerimientos de estructuras anuales y 64% retención).

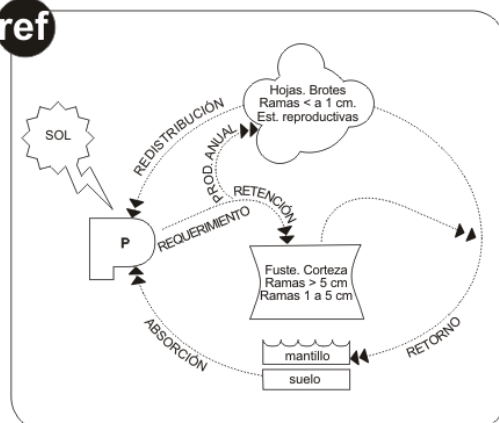
La redistribución de los nutrientes contribuyó a los requerimientos en distintos grados para cada nutriente (N: 37%, P: 36%, K: 37%, Mg: 31%). En el caso del Ca la redistribución fue nula y los requerimientos de dicho nutriente fueron provistos totalmente por la absorción.

El retorno de nutrientes a través de la caída fina representó 69% del N, 59% del P, 52% del K, 82% del Ca y 77% del Mg absorbido a lo largo de un año.

Figura 9: Flujos de nutrientes y reservorios de masa mineral considerados. Los valores de C se expresan en 1.10^{-3} de las unidades correspondientes para cada flujo o compartimento.

Flujos de nutrientes

ref

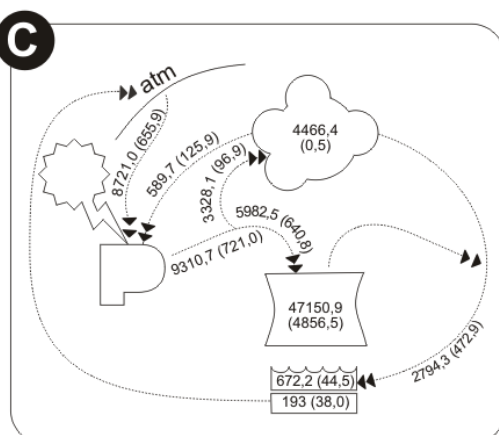


kg . ha⁻¹ . año⁻¹

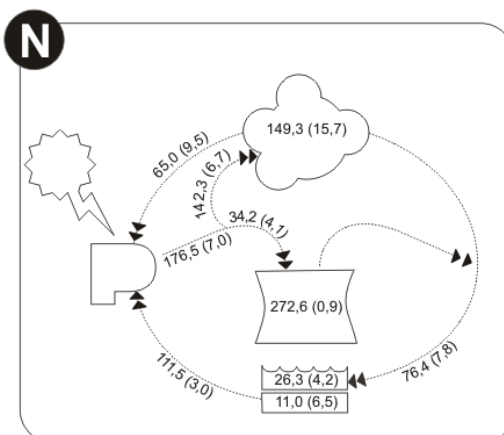
kg . ha⁻¹

Mg . ha⁻¹

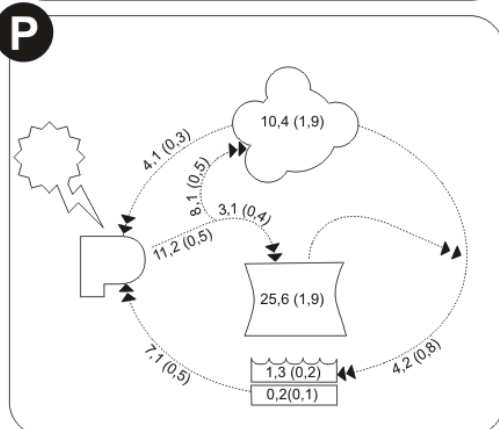
C



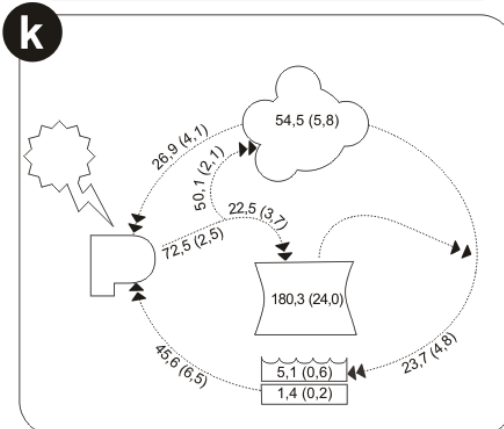
N



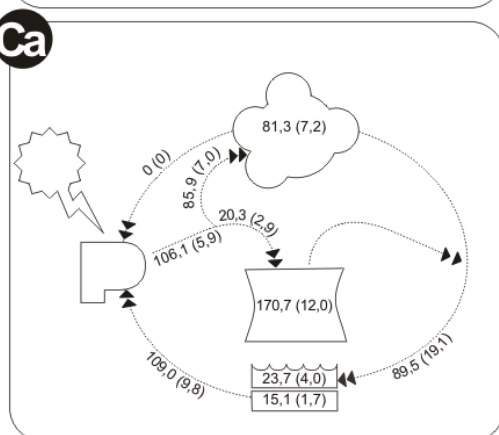
P



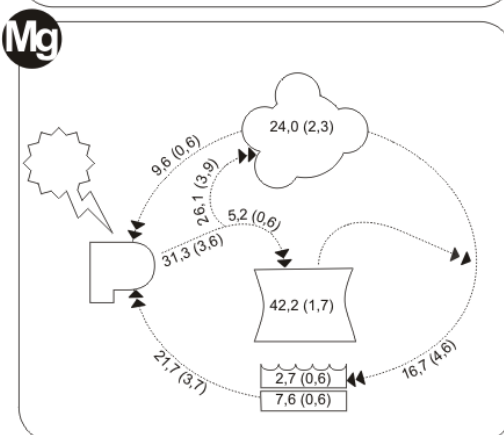
k



Ca



Mg



Índices de eficiencia

A nivel de la hoja, el índice de eficiencia de redistribución instantánea fue similar para N (31%), P (36%) y Mg (31%), y superior para K (53%).

Tanto para el N como para el P la proficiencia de redistribución resultó incompleta según los rangos establecidos por Killingbeck (1996) presentando valores de 12mg N/g y de 0,8 mg P/g. En el caso del K, la proficiencia fue de 3,4 mgK/g.

La Eficiencia de redistribución de la plantación presentó valores similares para el N, P y K (36-37%) y menor para el Mg (31%).

El índice de eficiencia de redistribución (REI) fue (media \pm error estándar): $0,6 \pm 0,1$ para el N, $1,4 \pm 0,7$ para el P, $0,9 \pm 0,4$ para el K y $0,5 \pm 0,2$ para el Mg.

La eficiencia en el uso de nutrientes, que indica la cantidad de materia producida por unidad de nutriente absorbido, fue (media \pm error estándar):

N = 171 ± 5 , P = 2701 ± 222 , K = 422 ± 22 , Ca = 177 ± 17 y Mg = 908 ± 136 .

Discusión

Las plantaciones estudiadas presentaron una biomasa total de 113 Mg/ha, similar a la reportada por Toro (2006) para plantaciones de *Populus* en la zona central de Chile, las que se caracterizan por generar a los 13 años de edad una biomasa aérea entre 100 y 122 Mg/ha. Tanto en las plantaciones chilenas como en las del delta del Paraná, el fuste sin corteza fue el compartimento con mayor porcentaje de biomasa (71 y 63% respectivamente), y el menor porcentaje correspondió a las hojas (2,4 y 3,2% respectivamente)

La productividad primaria aérea neta (PPAN) fue destinada en su mayor parte al crecimiento del fuste. El valor estimado de PPAN ($19,1 \pm 1,5$ Mg ha⁻¹año⁻¹) resultó superior al estimado por Di Stilio *et al.* (1995) para plantaciones de 10 años edad pero situadas en el delta inferior, sin protección de diques ($13,3$ Mg ha⁻¹año⁻¹) y para plantaciones protegidas por diques de 6 años de edad ($15,6$ Mg ha⁻¹año⁻¹). Dichas diferencias podrían deberse a que al ser el primer ciclo productivo luego de los movimientos de tierra producidos en la construcción de los diques y zanjales de drenaje, una gran cantidad de nutrientes podría haber quedado en forma disponible para la forestación. Además la protección de los diques y zanjales, evita el ingreso de agua proveniente de las crecientes del río y la saturación de agua el perfil del suelo que generaría condiciones de anaerobiosis. Otra posible causa de estas diferencias en la productividad puede tener origen en el factor genético de la forestación. Por otro lado, la diferencia de edad de las plantaciones comparadas indicaría que cada una se encuentra en un punto distinto en la curva de crecimiento.

Estas diferencias en la productividad entre la plantación endicada de 6 de edad estudiada por Di Stilio *et al.* (1995) y la del presente trabajo (10 años de edad) se invirtieron en la caída, que fue

superior en la primera (7,3 Mg/ha), con respecto a la segunda (6,2 Mg/ha). La diferencia en la caída depende en gran medida de la biomasa foliar, y ésta de los tratamientos silviculturales aplicados. Por otra parte, el período de máxima caída fue coincidente en ambas plantaciones.

La masa del mantillo varió estacionalmente, con valores mínimos a principios de otoño y máximos durante el invierno y primavera temprana. Estos cambios indicarían que las máximas tasas de descomposición ocurrieron en el verano. Estas variaciones estacionales son coincidentes con las reportadas por Vicari *et al.* (1998) en un estudio de la descomposición del mantillo realizado en la misma zona, en plantaciones de *P. deltoides* protegidas de la inundación. La tasa de recambio del mantillo (K_L) calculada a partir de los datos presentados por Di Stilio *et al.* (1995) y Vicari *et al.* (1998) fue $2,3 \text{ año}^{-1}$. Este valor es menor a la tasa de recambio calculada en el presente estudio, $K_L = 3,6 \text{ año}^{-1}$. El índice K_L sólo contempla a las primeras etapas de la descomposición, ya que no tiene en cuenta fases de la descomposición en las que ya los detritos no son reconocibles como material vegetal (Swift *et al.*, 1979). Las diferencias encontradas en K_L entre ambas plantaciones comparadas podrían, entre otras, involucrar las diferencias en la masa de mantillo que fue aproximadamente dos veces superior en la plantación estudiada por Vicari *et al.* (1998) (3,1 Mg/ha), comparada con la del presente estudio (1,7 Mg/ha).

La concentración de N, P y K en distintos compartimentos de la biomasa fueron similares a las reportadas por Lodhiyal *et al.* (1995) en plantaciones de *P. deltoides* del Himalaya. Las concentraciones de los nutrientes mostraron un patrón típico, con valores mayores en las estructuras más dinámicas y activas funcionalmente (hojas, brotes) y concentraciones más bajas en el leño. Dado que el N y/o el P constituyen los elementos frecuentemente limitantes de la productividad primaria neta, el cociente N/P de las hojas permite establecer la naturaleza de esta limitación a nivel de la comunidad (Koerselman y Meuleman, 1996). Dicho cociente es utilizado como una herramienta más rápida y simple, alternativa a los laboriosos experimentos de fertilización (Koerselman y Meuleman, 1996). De acuerdo con estos autores valores superiores a 16 indican limitación de P y valores inferiores a 14 muestran limitación de N, mientras que valores intermedios señalan co-limitación de ambos nutrientes. En el caso de la plantación de álamos estudiada, el cociente N/P fue 19, lo cual estaría evidenciando una menor disponibilidad de P comparado con el N. Estos registros son coincidentes con Bonfils, (1962) quién menciona la baja disponibilidad de P en las asociaciones de suelos del Bajo Delta y menciona a las crecientes del río Paraná como principal aporte de este nutriente a través de la deposición de estos sedimentos. Según Ceballos (com. pers.) si bien la disponibilidad de P es baja en estos suelos, las relaciones con el N también serán altas dado a que este es aportado al suelo en las transiciones de pajonales (*Scirpus giganteus*) a forestaciones producto de la incorporación de la biomasa aérea y el mantillo de los pastizales mencionados.

En las plantaciones del Delta se encontraron para todos los nutrientes, exceptuando al calcio, valores mayores de mineralomasa aérea que en las plantaciones chilenas (600 kg/ha de calcio, 250 kg/ha de nitrógeno, 150 kg/ha de potasio, 58 kg/ha de magnesio, 22 kg/ha de fósforo, Toro *et al.* (2006).

Considerando la definición de costo nutritivo como la cantidad de nutrientes eliminados del sistema por extracción de productos del bosque (Goya *et al.*, 2003) y suponiendo un sistema de cosecha de fuste entero, en el que se extraiga del sitio sólo el fuste, al realizar el desrame *in situ*, la cantidad de nutrientes exportados del sistema con respecto a la mineralomasa aérea total es C: 62%, N:22%, Mg: 27%, P: 37%, K: 41% y Ca: 24%. Suponiendo que el sistema de cosecha a emplear fuera el de árbol completo, en el que luego del apeo de cada árbol, éste se extrajera del monte hacia una playa de trozas donde se realiza el desrame y troce del fuste. En este sistema de cosecha además del fuste se extraen la totalidad de las ramas y hojas. Por lo tanto la exportación de nutrientes sería completa, lo que implica una extracción aproximadamente 2 veces mayor de C y K, 3 veces mayor de P, 4 veces mayor de Ca y Mg y 5 veces mayor de N comparado con la cosecha del fuste solamente.

Estas diferencias ponen en evidencia que al momento de elegir el sistema de cosecha, la exportación de nutrientes debe ser un factor de análisis en la toma de decisiones.

Los requerimientos anuales de nutrientes, con excepción del C, fueron destinados en una alta proporción a la producción de estructuras anuales. El incremento anual de tejidos permanentes de la biomasa aérea (retención) representó entre el 17 y el 31% de los requerimientos según el nutriente. Estas proporciones de los requerimientos retenidas en la biomasa son similares a la señalada por Nelson *et al.* (1987) en plantaciones de *P. deltoides* (13 a 27%) en el valle del Mississippi inferior.

La caída es señalada como la mayor vía de retorno al suelo (Vitousek y sanford, 1968) y las hojas constituyeron el compartimento con mayor importancia en dicho flujo en las plantaciones estudiadas. Di Stilio *et al.* (1995) arribaron a un resultado similar, pero pese a que la caída al mantillo allí reportada fue 1,2 veces mayor a la del presente estudio, dichos autores estimaron valores de retorno de N y Mg 2 veces superiores, y de P y K 3 veces superiores, debido principalmente a que las concentraciones que estimaron en la caída también fueron mayores a las obtenidas en este trabajo. Esto indicaría que las eficiencias de redistribución de nutrientes estimadas en el presente estudio serían mayores que en la plantación estudiada por Di Stilio *et al.* (1995).

Los índices de eficiencia de redistribución a nivel de la hoja muestran que sólo para el K la redistribución fue mayor al 50%. Le siguió en importancia la redistribución del P (44%) y los valores más bajos correspondieron al N y Mg (35 y 32% respectivamente). Es de destacar que en el presente estudio los valores de redistribución de Mg a nivel de la hoja fueron similares a los del N. En estudios recientes, mediante técnicas de enriquecimiento con isótopos estables, se ha puesto en

evidencia la importancia de la circulación interna del Mg en la producción de nuevas estructuras. El aporte de la redistribución de Mg al crecimiento de nuevos tejidos en *Pinus sylvestris* varió entre el 39 y 43% (Proe *et al.*, 2000) y entre 32 y 57% en *Picea sitchensis* (Weatherall *et al.*, 2006). Los valores de pH de estos suelos podrían estar influyendo en la disponibilidad de este nutriente.

La proficiencia de redistribución, definida como el mínimo nivel al que puede ser reducida la concentración de nutrientes en las hojas senescentes (Killingbeck, 1996) resultó incompleta para el N y P. Aunque esta autora cita que *P. deltoides* alcanza proficiencias de N y P completas (N: 6,8 mg/g y P: 0,2 mg/g), la proficiencia potencial (máxima reabsorción que puede alcanzar una población dada) no siempre coincide con la proficiencia realizada (reabsorción obtenida en un año determinado de estimaciones). Numerosos factores, entre ellos la disponibilidad hídrica pueden influir en las variaciones interanuales (Killingbeck 1996). Aunque potencialmente *P. deltoides* podría reducir los valores de concentración de N y P en la senescencia foliar, tanto los resultados obtenidos en el presente estudio como las proficiencias estimadas a partir de las concentraciones de N y P en la caída foliar reportadas por Di Stilio *et al.* (1995) (23 mgN/g y 1,5 mgP/g respectivamente) muestran proficiencias incompletas.

A nivel de la comunidad, el índice de eficiencia de redistribución, REI, estimado para el N y P permite identificar tres grupos de especies: i) en las que predomina el reciclado bioquímico o interno ($REI > 2$), ii) en las que predomina el reciclado biogeoquímico o externo ($REI < 1$), y iii) en las que el reciclado interno y externo tienen similar importancia ($1 < REI < 2$) (Cuevas y Medina, 1998). En el caso de la plantación estudiada, sólo para el P (REI: 1,4) ambas vías de provisión de nutrientes tuvieron igual importancia. Además, si se hace extensiva la aplicación de este índice al K y Mg puede concluirse que tanto para el N, como para el K y Mg (REI: 0,5-0,9) la vía biogeoquímica es de mayor importancia que la vía bioquímica o de reciclado interno. También a escala de la plantación se evidenció que la mayor parte de los nutrientes requeridos en la productividad aérea fueron provistos por la absorción ya que la redistribución de nutrientes aportó entre el 31 y el 37% de los mismos.

En síntesis, tanto los índices de eficiencia a nivel de la hoja como a nivel de la comunidad muestran el predominio de la vía biogeoquímica con respecto a la vía bioquímica en la provisión de nutrientes, aunque el grado de conservación interna de nutrientes sería mayor para el P, en concordancia con el desbalance foliar entre N y P señalado anteriormente a partir del cociente N/P.

Nelson *et al.* (1987) destacaron el predominio de los flujos biogeoquímicos en plantaciones de *P. deltoides*, donde la existencia de una rápida acumulación de nutrientes fue sostenida a partir de su rápida circulación en el ecosistema. En tal sentido, en el presente estudio los valores de K_L para los nutrientes del mantillo mostraron valores elevados, (3-4 año⁻¹) para el N, P, y Ca y mayores aún (5-6 año⁻¹) para el K y Mg. Es de esperar que *P. deltoides* alcance altas tasas de crecimiento

cuando es implantado en suelos con una buena disponibilidad de nutrientes. Su dependencia de los procesos de mineralización/inmovilización podría determinar, en cambio, bajo crecimiento en suelos infértiles.

Las eficiencias en el uso de los nutrientes obtenidas en el presente estudio fueron similares en el caso del N y el K a la estimada por Lodhiyal *et al.* (1995) para la parte aérea de plantaciones de *P. deltoides* clon D₁₂₁ de 8 años de edad en el Himalaya central (EUN: N = 167, P = 1438, K = 318). En cambio, las plantaciones estudiadas mostraron que son altamente eficientes en el uso del P, ya que duplicaron la eficiencia obtenida para este nutriente por Lodhiyal *et al.* (1995).

Conclusiones

Las plantaciones de *P. deltoides* implantadas en el delta del Paraná protegidas de las inundaciones mostraron una elevada productividad primaria neta que fue destinada en una alta proporción al crecimiento del fuste.

Las hojas representaron una proporción pequeña de la biomasa pero tanto desde el punto de vista funcional como por su almacenaje de nutrientes constituyen un componente clave en el sostenimiento de la productividad de las plantaciones, de modo tal que al momento de elegir el sistema de cosecha, el costo nutritivo de la misma debe ser un factor de análisis en la toma de decisiones.

Los flujos de nutrientes mostraron que la alta PPAN de estas plantaciones fue sostenida por requerimientos que fueron destinados en una mayor proporción a la producción de los componentes más dinámicos de las plantas: las hojas. A su vez prevaleció el ciclado biogeoquímico de los nutrientes. Esto significa que los requerimientos fueron satisfechos en mayor proporción por la absorción de nutrientes, por lo cual para mantener estas altas tasas de producción en plantaciones de ciclos cortos de rotación resulta indispensable el sostenimiento de la fertilidad del suelo. Nuevamente surge que un manejo adecuado de los residuos de la cosecha constituye un elemento clave para mantener sucesivos ciclos de producción de estas plantaciones en el área de estudio.

De los nutrientes analizados, ninguno de los índices estimados mostró al N como limitante del crecimiento. En cambio puede considerarse al P como un elemento crítico, ya que fue el que evidenció una mayor tendencia a ser conservado internamente (circulación bioquímica) y a que las plantaciones hicieron un uso altamente eficiente de este nutriente. La eficiencia de redistribución del Mg, similar a la del N, y los valores de eficiencias en el uso de este nutriente lleva a pensar que habría que profundizar los estudios sobre dinámica del Mg para corroborar si éste podría constituir un elemento limitante de la productividad de la plantación.

Pasantías vinculadas

- Dinámica de nutrientes en plantaciones de *Populus deltoides* en el Delta del Paraná.
- Curso de Inglés técnico 1.
- Curso optativo de Diseño experimental.

Bibliografía

ATTIWILL, P.M., G.W. LEEPER (1987) *Forest soils and nutrient cycles*, Melbourne University Press

BERRONDO, M. (1988) *Agrometeorología: Informe anual. Estación Experimental Forestal INTA Delta. Otamendi, Pcia. de Bs AS*. Mimeografiado.

BONFILS, C.G. (1962) Los suelos del Delta del Río Paraná: Factores generadores, clasificación y uso. *INTA. Publicación N° 82*, ISA Instituto de Suelos y Agroecología, Buenos Aires.

BORODOWSKI, E., R. SUÁREZ (2005) *Caracterización forestal de la región del Delta del Paraná*. SAGPyA, NEF Delta, Buenos Aires.

CEBALLOS D., FERNÁNDEZ TSCHIEDER E, ÁLVAREZ J., FRACASSI N. (2006) *Análisis de factores críticos para la sustentabilidad de plantaciones forestales*. SAGPyA, Modulo Delta. Informe final PNFOR2214, INTA-.

CLUTTER, J.L., FORTSON, J.C., PIENAAR, L., BRISTER, G.H., BAILEY, R.L. (1983). *Timber Management: A Quantitative Approach*, J. Wiley and Sons, p. 333

COLE, D.W., M. RAPP (1981) *Elemental cycling in forest ecosystems*, En Reichle, C.E. (Ed.). *Dynamic Properties of Forest Ecosystems*, Cambridge University Press. Cambridge (p. 341-409).

CROW, T.R. (1988). A guide to using regression equations for estimating tree biomass. *North. J. Appl. For.* 5: 15-22.

CUEVAS, E., E. MEDINA (1998). The Role of nutrient cycling in the conservation of soil fertility in tropical forested ecosystems. *Ecology Today: An Anthology of Contemporary Ecological Research*, New Delhi: International Scientific Publications, p. 263-278.

CHAPIN III, F.S., P.A. MATSON, H.A. MOONEY (2002) *Principles of terrestrial ecosystem ecology*, Nueva York: Springer-Verlag, p. 436.

DI STILIO, V., R. VICARI, F. MENALLED (1995) *Cuantificación de la caída y contenido de nutrientes de materiales del canopy en plantaciones de Populus deltoides del Delta Inferior del río Paraná (Argentina)*, Buenos Aires: Physis, Secc. C, 50 (118-119): 95-104.

GOYA, J.F., J.L. FRANGII, F. DALLA TEA (1997) Relación entre biomasa aérea, área foliar y tipos de suelos en plantaciones de Eucalyptus grandis del NE de Entre Ríos, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía*, La Plata 102 (1): p. 11-21.

KANDUS, P. (1997) *Análisis de patrones de vegetación a escala regional en el Bajo Delta Bonaerense del Río Paraná (Argentina)* Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.

KILLINGBECK, K. (1996). Nutrients in senesced leaves: Key to the search for potential resorption and resorption proficiency. *Ecology* 77(6): 1716-1727.

KIMMIS, J.P. (1987). *Forest ecology*. Mcmillan Publishing Company, Nueva York (p. 531).

KOERSELMAN, W., A.F.M. MEULEMAN (1996). *The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation*, J. Appl. Ecology. 33:1441-1450.

LACLAU, J.P., P. DELEPORTE, J. RANGER, J.P. BOUILLET, G. KAZOTTI (2003). Nutrient Dynamics throughout the rotation of Eucalyptus Clonal Stands in Congo, *Annals of Botany* 91: 879-892.

LANDSBERG, J.J. (1986) *Physiological ecology of forest production*. Academic Press, London, (p.198).

LODHIYAL, R., P. SINGH, S.P. SINGH (1995). *Structure and Function of an Age Series of Poplar Plantations in Central Himalaya*. *Annals of Botany* 76: 191-199.

MALVÁREZ, I. (1997) *Las comunidades vegetales del Delta del Río Paraná. Su relación con factores ambientales y patrones del paisaje*. Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.

MARSCHNER, H. (1986) *Mineral nutrition of higher plants*. San Diego, California: Academic Press.

NELSON, L.E., G.L. SWITZER, B.G. LOCKABY (1987) Nutrition of *Populus deltoides* plantations during maximum production. *Forest Ecology and Management* 20: 25-41

PROE, M.F., A.J. MIDWOOD, J. CRAIG (2000) Use of stable isotopes to quantify nitrogen, potassium and magnesium dynamics in young Scots pine (*Pinus sylvestris*). *New Phytol.* 146, 461-469

SENISTERRA, G., DUCID, M.G., VAZQUEZ M., DIMARCO, E. (2006) Determinación de nutrientes en madera y corteza de clones de *Populus* spp en provincia de Santa Fe, Argentina. *Revista Biocell* (en prensa).

STRAHLER, A.H., A.N. STRAHLER (1992) *Modern physical geography*, Nueva York: John Wiley and Sons.

SWITZER, G.L., L.E. NELSON (1972) *Nutrient accumulation and cycling in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation ecosystems: the first twenty years*. *Soil. Sci. Soc.Amer. Proc.* 36: 143-47.

TERRADAS, J. (2001) *Ecología de la vegetación: de la ecofisiología de las plantas a la dinámica de comunidades y paisajes*, Barcelona: Editorial Omega.

TORO, J., L. VILLACURA, J. ULLOA, A. HERNANDEZ (2006) Aplicación de una silvicultura específica para elevar la productividad de las plantaciones de álamos en la zona central de Chile. *Actas Jornadas de salicáceas 2006*: 316-323.

VICCARI, R.L., F. MENALLED, V. DI STILLIO, N. MADANE (1998). *Descomposición de la hojarasca en una plantación de álamos (Populus deltoides) en el Delta Inferior del río Paraná*, Buenos Aires: *Physis* Secc. C, 56(130-131): 9-13

VICCARI, R.L., F. MENALLED, V. DI STILIO, S.UCHA, N. MADANES (1999) *Productividad y ciclo del nitrógeno en dos plantaciones de álamos (Populus deltoides) con diferentes dinámicas de inundación en el Delta inferior del Río Paraná*, Buenos Aires: *Physis*, Secc. C, 57(132-133): 41-51.

VITOUSEK, P.M., R. L.SANFORD (1986) Nutrient cycling in moist tropical forest. *Ann. Rev. Ecol. and Syst.* 17: 137-167.

WEATHERALL, A., M.F. PROE, J. CRAIG, A.D. CAMERON, A.J. MIDWOOD (2006) Internal cycling of nitrogen, potassium and magnesium in young Sitka spruce. *Tree Physiology* 26: 673–680

WHITTAKER R.H., G. WOODWELL (1968). *Dimension and production relations of trees and shrubs in the Brookhaven Forest*, *Journal of Ecology* 56: 1-25, Nueva York.